

## СВЯЗЬ ПЛОТНОСТЕЙ ПОТОКОВ С ДЛИНОЙ ФАКЕЛА В РАБОЧЕМ ПРОСТРАНСТВЕ ПЛАВИЛЬНОЙ ВАННОЙ ПЕЧИ

### Аннотация

*Приведены результаты математического моделирования формирования лучистых потоков в рабочем пространстве плавильной (стекловаренной, мартеновской) печи при различных схемах отопления и их (потоков) распределения по поверхности ванны и ограждающих конструкций. Выявлено существенное влияние длины факела на технико-экономические показатели работы агрегата.*

**Ключевые слова:** *плавильная ванная печь, стекловаренная печь, математическое моделирование, длина факела, потоки излучения, температурное поле.*

### Abstract

*The paper provides mathematical modelling results of radiation flow formation in the work space of the smelting (glassmaking, open-hearth) furnace with different heating patterns and flow distribution over the surface of the bath and enclosing structures. A significant influence of the flame length upon technical and economic parameters of furnace operation was found out.*

**Key words:** *bath smelting furnace, glass-melting furnace, mathematical modelling, flame length, radiation flows, temperature field.*

*Постановка задачи.* Для оценки связи длины факела с плотностями потоков нами была построена трехмерная математическая модель внешней задачи в печи с жидкой ванной [1-3]. В математической модели для решения был использован зональный метод [4-5]. В задачах зонального метода отдельные потоки имеют разный физический смысл, поэтому их связь с таким параметром факела, как его длина, имеет свои особенности [6-8]. В балансовом плане наибольшую связь с теплотребованиями (в том числе и с расходом топлива) имеют результирующие потоки. И здесь проявляется прежде всего различие типа зон, их теплообменного характера. Зоны поверхности расплава являются зонами II рода, для которых заданы теплотребования в виде значений удельных результирующих потоков (также учитываются потери теплоты через стенки и дно бассейна); по этой причине от длины факела могут зависеть лишь локальные характеристики теплообмена – в среднем ситуация не должна зависеть от длины факела.

*Плотности тепловых потоков на поверхности расплава и свода печи.* В табл. 1 приведены данные, которые подтверждают это положение. Цифры в последнем столбце табл. 1 характеризуют разброс величин результирующих потоков (их среднеквадратичное отклонение). Он определяется по формуле:

$$\sigma_q = \sqrt{\frac{1}{L \cdot B} \int_0^L \int_0^B [q(x, y) - q_{\text{сред}}]^2 dx dy},$$

где  $L$  и  $B$  – длина и ширина печи, м.

Таблица 1

Параметры результирующих потоков на поверхности стекломассы

Длина факела, м	$q_{max}$ , кВт	$x_{max}$ , м	$y_{max}$ , м	$q_{ср}$ , кВт	$\sigma_q$ , кВт
3,178	1906,513	6,339	1,773	546,624	441,634
6,300	1913,720	6,350	1,722	548,651	442,946
9,534	1917,190	6,347	1,723	548,945	443,322
11,580	1918,799	6,349	1,723	548,945	443,322
13,620	1916,399	6,349	1,727	547,699	442,840

На рис. 1 показана типичная картина распределения потоков по поверхности расплава (на всех рисунках цифры на кривых – величина потока, кВт).

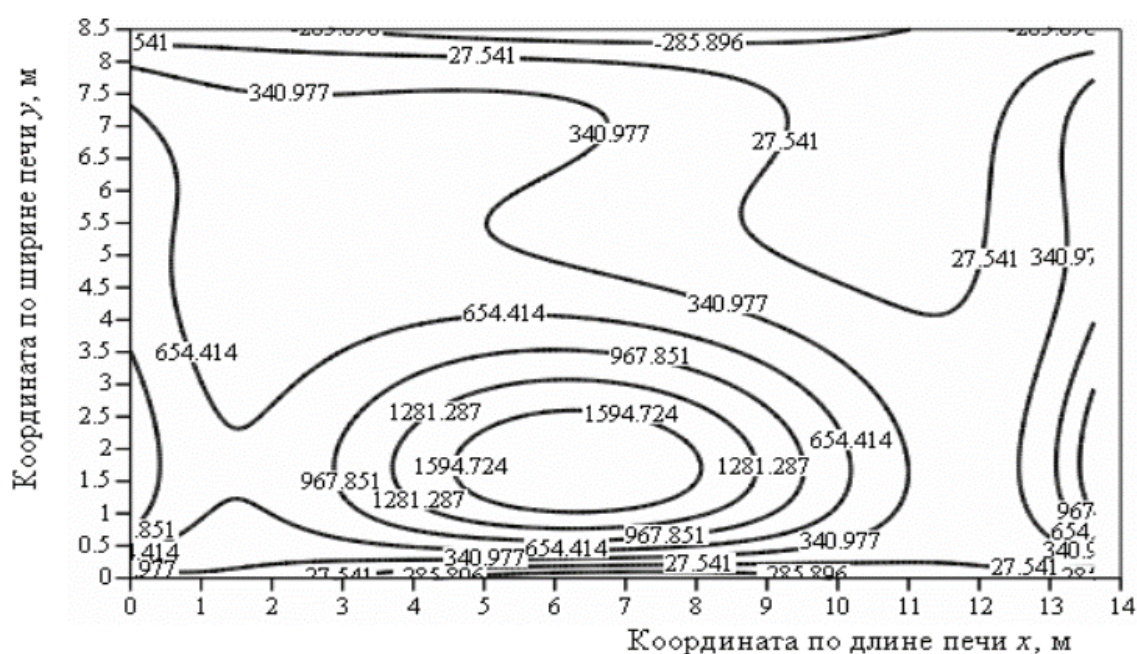


Рис. 1. Результирующие потоки на поверхности ванны

Зоны свода печи относятся к зонам третьего рода, для которых задаются связи температуры зоны с плотностью результирующего потока. Так как при изменении длины факела распределение тепловыделений также изменяется, то картина результирующих потоков будет зависеть от длины факела. Поскольку результирующие потоки в соответствии с названием отражают суммарный итог лучисто-конвективного теплообмена, то эти зависимости будут не слишком сильными, но все же заметными.

В табл. 2 показаны параметры распределения результирующих потоков по поверхности свода. Из данных табл. 2 можно видеть, что в общем случае при увеличении длины факела условия службы огнеупоров свода ухудшаются, так как значения потоков возрастают не только в точке максимума, но и в среднем.

Картина распределения результирующих потоков на своде вполне типична и при разных длинах факела отличается лишь в деталях. На рис. 2 в качестве примера показано распределение для базовой длины факела (9,534 м).

Таблица 2

Параметры результирующих потоков на поверхности свода

Длина факела, м	$q_{max}$ , кВт	$x_{max}$ , м	$y_{max}$ , м	$q_{срел}$ , кВт	$\sigma_q$ , кВт
3,178	13,266	6,087	6,758	6,936	3,277
6,300	13,624	6,563	6,529	7,613	2,997
9,534	12,998	6,985	6,236	7,997	2,827
11,58	13,466	7,202	6,268	8,395	3,020
13,62	14,089	7,113	6,313	8,412	3,093

В отличие от результирующих потоков, которые в неявной форме учитывают теплотребления, падающие тепловые потоки в балансовом плане являются «полуфабрикатом», так как характеризуют приход теплоты без отслеживания ее дальнейшего расходования. В этом случае различие поверхности стекломассы и поверхности свода как приемников излучения проявляется лишь через радиационные характеристики и расстояния до объемов тепловыделения (до факела). Так как геометрически факел ближе к поверхности ванны, то по величине падающие на нее потоки будут несколько выше, что хорошо видно из сопоставления данных табл. 3 и табл. 4.

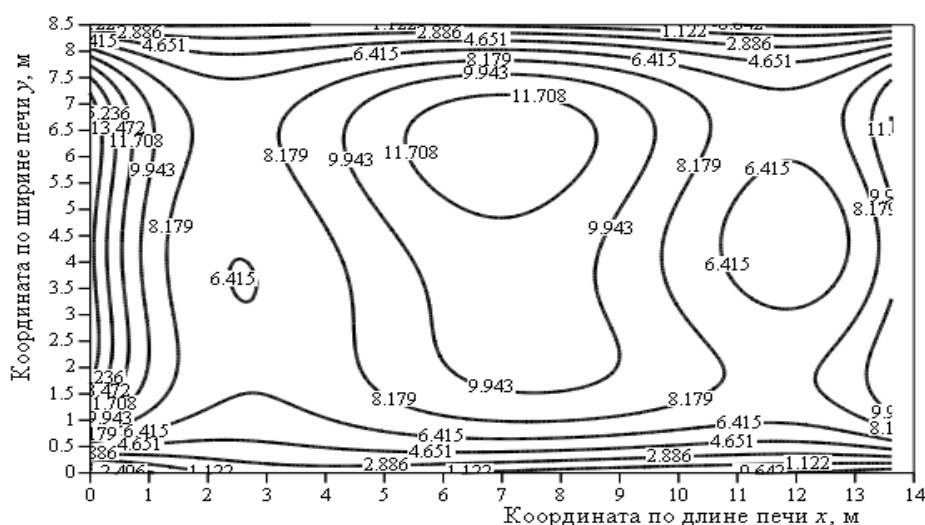


Рис. 2. Распределение результирующих тепловых потоков по поверхности свода при базовой длине факела

Можно видеть, что в обоих случаях из примерно одинаковых закономерностей выпадает самый короткий факел (3,178 м). Распределение потоков для этого факела показано на рис. 3.

Отметим, что распределение падающих потоков по поверхности стекломассы при данной длине факела точно такое же, имеется лишь количественное отличие потоков, что, собственно, уже видно из данных табл. 3 и табл. 4.

При других длинах факела устанавливается в качественном плане однотипное распределение падающих потоков как по поверхности стекломассы, так и по

поверхности свода. Пример такого распределения дан на рис. 4 для поверхности ванны при длине факела 11,58 м.

Таблица 3

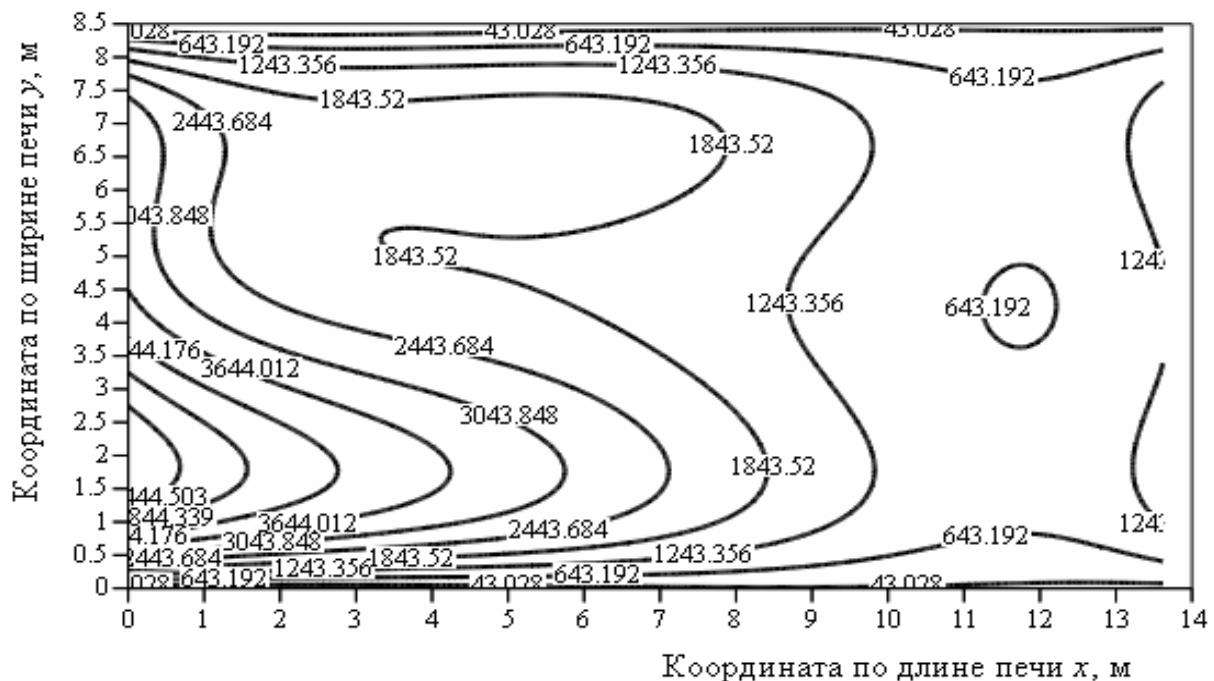
Параметры падающих потоков на поверхности стекломассы

Длина факела, м	$q_{max}$ , кВт	$x_{max}$ , м	$y_{max}$ , м	$q_{ср}$ , кВт	$\sigma_q$ , кВт
3,178	5622,650	0,000	1,932	1817,145	1267,785
6,300	4976,533	5,655	1,792	2119,416	1221,137
9,534	5205,960	6,854	1,780	2191,285	1197,814
11,580	4975,711	7,123	1,856	2231,086	1199,315
13,620	4485,394	7,098	6,764	2125,690	1165,064

Таблица 4

Параметры падающих потоков на поверхности свода

Длина факела, м	$q_{max}$ , кВт	$x_{max}$ , м	$y_{max}$ , м	$q_{ср}$ , кВт	$\sigma_q$ , кВт
3,178	6045,190	0,000	1,860	1774,035	1126,632
6,300	4316,125	5,335	1,786	2112,410	965,099
9,534	4424,280	6,818	1,777	2228,115	937,690
11,580	4250,628	7,169	1,842	2288,739	971,194
13,620	4035,914	7,263	6,710	2179,024	962,680



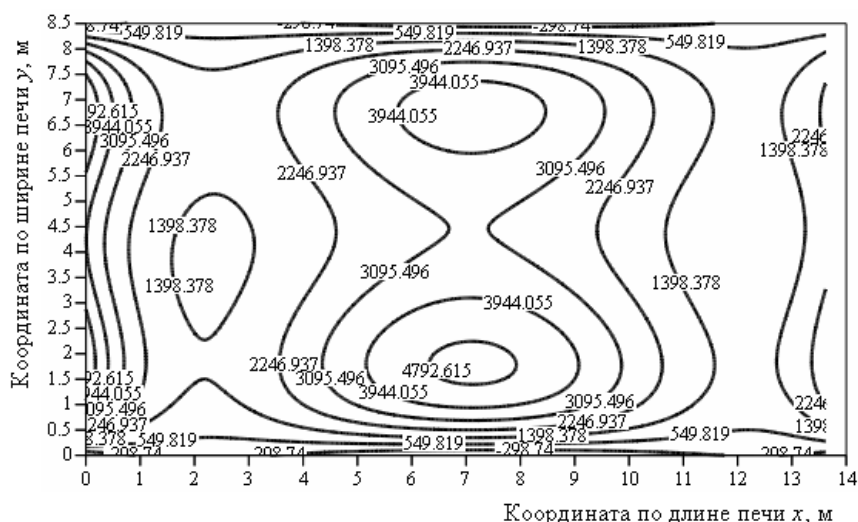


Рис. 4. Распределение падающих потоков по поверхности ванны при длине факела, равной 11,58 м

**Закключение.** Такого рода математическое моделирование, базирующееся на вычислениях в рамках зонального метода решения интегродифференциальных уравнений радиационно-конвективного переноса энергии, позволяет не только осуществить правильный выбор огнеупорных материалов ограждений печи, но и способствует оптимизации ее (печи) конструктивных и режимных параметров.

#### Список использованных источников

1. Швыдкий В.С., Дзюзер В.Я. Проектирование энергоэффективных стекловаренных печей. – М.: Теплотехник, 2009. – 339 с.
2. Dzyuzer V.Ya., Shvydkii V.S. Boundary conditions for designing the lining of a glass-founding furnace with innovative parameters to improve technical efficiency // Refractories and industrial ceramics. 2016. Vol. 56. Iss. 6. Pp. 597-600.
3. Dzyuzer V.Ya., Shvydkii V.S., Sadykov E.B. Modeling of the thermal operation of a high-capacity glassmaking furnace // Glass and ceramics. 2013. Vol. 69. Iss. 9-10. Pp. 302-305.
4. Швыдкий В.С., Спирин Н.А., Ладыгичев М.Г., Ярошенко Ю.Г., Гордон Я.М. Элементы теории систем и численные методы моделирования процессов тепломассопереноса. – М.: "Интермет Инжиниринг", 1999. – 520 с.
5. Турчак Л.И., Плотников П.В. Основы численных методов. – М.: Физматлит, 2002. – 304 с.
6. Dzyuzer V.Ya. Generalized analysis of the heat work of glassmaking furnaces // Refractories and industrial ceramics. 2017. Vol. 58. Iss. 1. Pp. 25-28.
7. Sokolov B.A., Abakin D.A. Use of the heat of molten glass aided by circulating furnace gases // Glass and ceramics. 2017. Vol. 74. Iss. 7-8. Pp. 278-281.
8. Sborshchikov G.S., Terekhova A.Yu. Selection of the optimal air heating temperature for glassmaking tank furnaces // Glass and ceramics. 2017. Vol. 74. Iss. 1-2. Pp. 18-19.